

## SISTEMAS RADAR APLICADOS A LA INVESTIGACIÓN DE SUBSIDENCIA Y MOVIMIENTOS DE LADERA

### *Radar systems applied to subsidence and landslides investigations*

Gerardo Herrera (\*), Roberto Tomás (\*\*), Juan Manuel López-Sánchez (\*\*\*), Oriol Monserrat (\*\*\*\*), Geraint Cooksley (\*\*\*\*\*), y Joaquín Mulas (\*)

#### RESUMEN

En este trabajo se presentan los sistemas radar satélite y terrestres, así como los métodos de análisis de imágenes radar clásicos y avanzados para la investigación de los movimientos del terreno, haciendo énfasis en la subsidencia y los movimientos de ladera. Para ello en primer lugar se describen los distintos sensores radar disponibles así como las principales características de las imágenes radar generadas. A continuación se detallan los aspectos fundamentales de la interferometría diferencial, de los distintos métodos de interferometría diferencial avanzada y del radar terrestre. Finalmente se presentan los resultados obtenidos en distintas zonas de estudio: la subsidencia por explotación del acuífero en el área metropolitana de Murcia, la subsidencia minera y los movimientos de ladera de la Sierra de Cartagena, los movimientos de ladera de la cuenca del río Gállego y el deslizamiento del Portalet.

#### ABSTRACT

In this paper satellite and ground based radar systems are presented, as well as standard and advanced differential interferometry techniques, for subsidence and landslides research. In the first part available radar sensors are described as well as the main characteristics of radar images (SAR images). Then the key aspects of standard differential interferometry, advanced differential interferometry and ground based radar are shown. Finally, results retrieved in different study areas are presented: subsidence due to ground water withdrawal in the metropolitan area of Murcia, mining subsidence and mass movements in Sierra de Cartagena, landslides in river Gállego basin and landslides in Portalet.

**Palabras clave:** Radar, interferometría, teledetección, subsidencia, deslizamientos.

**Keywords:** Radar, interferometry, remote sensing, subsidence, landslides.

#### INTRODUCCIÓN

Los métodos de medida de las deformaciones del terreno sirven para cuantificar distintos aspectos del movimiento, tales como los desplazamientos relativos entre dos cuerpos, las inclinaciones, los movimientos en profundidad, la distribución espacial y temporal de los movimientos etc. Estos métodos se pueden clasificar en cinco grupos: métodos topográficos, métodos geodésicos, métodos fotogramétricos, métodos de teledetección y métodos instrumentales. La fotogrametría y la teledetección son las tecnologías que sirven para obtener información fiable de los objetos físicos y de su entorno a través de un proceso de captación, medida e interpretación de imágenes y representaciones digitales de patrones de energía obtenidos mediante sensores que no están en contacto con los objetos (Collwel, 1997). Los sensores pueden ser pasivos o activos. Los primeros miden la can-

tidad de energía electromagnética emitida, o reflejada de otra fuente como el Sol, por el objeto observado. Los segundos miden la radiación reflejada por el objeto observado previa excitación electromagnética generada o enviada por el propio sensor.

El radar es un sistema de teledetección activa que emite ondas de microondas, cuya frecuencia está comprendida entre 1 GHz y 100 GHz o, lo que es lo mismo, longitudes de onda comprendidas entre 3 mm y 30 cm. Las ondas de microondas, entre otras ventajas, son capaces de atravesar las nubes y la lluvia; permiten trabajar en condiciones de oscuridad al no depender de la iluminación solar; pueden penetrar, con limitaciones, en estructuras vegetales, nieve y suelo, y proporcionan una alta sensibilidad para medir distancia, rugosidad, humedad, etc. Los sistemas radar de apertura sintética (SAR) tienen un sensor radar

(\*) Área de Peligrosidad y Riesgos Geológicos. Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), c/ Alenza 1, E-28003 Madrid, Spain. [g.herrera@igme.es](mailto:g.herrera@igme.es); [joaquin.mulas@igme.es](mailto:joaquin.mulas@igme.es)

(\*\*) Departamento de Ingeniería de la Construcción, OO.PP. e Infraestructura Urbana, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Apdo. 99, E-03080 Alicante. [roberto.tomas@ua.es](mailto:roberto.tomas@ua.es)

(\*\*\*) Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Apdo. 99, E-03080 Alicante. [juanma.lopez@ua.es](mailto:juanma.lopez@ua.es)

(\*\*\*\*) Instituto de Geomática, Av. Canal Olímpic s/n, 08860 Castelldefels, Spain. [michele.crosetto@ideg.es](mailto:michele.crosetto@ideg.es)

(\*\*\*\*\* ) Altamira Information, c/ Còrsega, 381-387, 2n 3a - E-08037 Barcelona, Spain. [info@altamira-information.com](mailto:info@altamira-information.com)

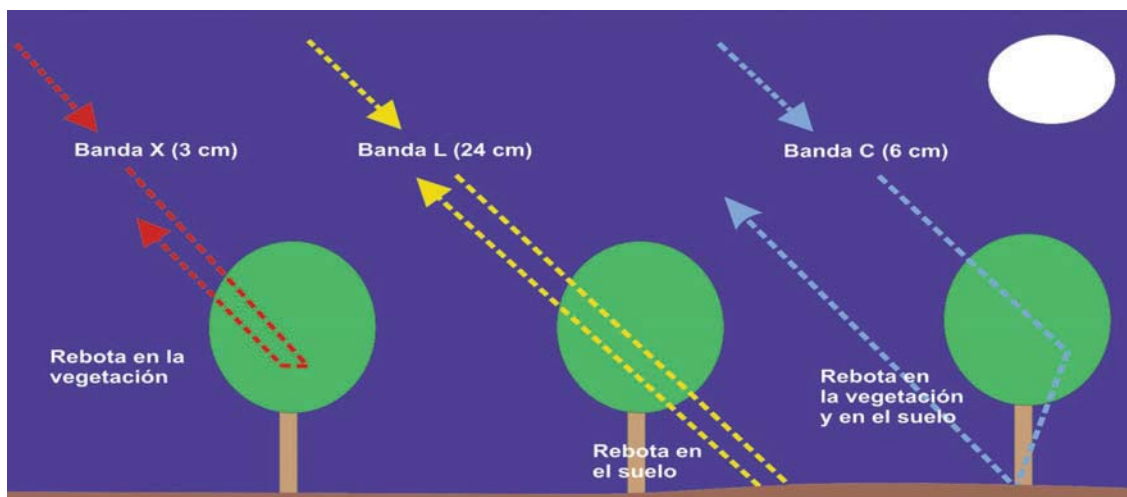


Fig. 1. Dibujo de la capacidad de penetración de las ondas radar.

que emite un pulso de ondas microondas hasta la superficie del terreno, momento en el que retorna en dirección al satélite y es medido por el sensor. Los pulsos empleados típicamente poseen longitudes de onda que varían desde los 3 cm de la banda X, hasta los 24 cm de la banda L. Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será su capacidad de penetración en zonas vegetadas (Fig.1) pero peor será su resolución espacial. Los sistemas radar, transportados por un satélite, un avión o una plataforma terrestre (Fig. 2), emiten y reciben la señal radar, generando imágenes complejas de alta resolución espacial de la superficie del terreno a las que se les llama imágenes SAR. En el caso de los satélites ERS-1/2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea el sensor emite ondas en banda C, con una longitud de onda de 6 cm, generando imágenes SAR con una resolución espacial de de 4 m x 20 m. En el caso del satélite TERRASAR-X las ondas microondas emitidas son de la banda X y genera imágenes SAR de 1 m x 3 m de resolución.

Las imágenes SAR, adquiridas por satélites que trabajan en banda C, tienen un tamaño de 100 km x 100 km y una resolución espacial de 4 m x 20 m para cada píxel. Cada píxel es un número

complejo con un valor de amplitud y otro de fase. La amplitud está relacionada con el coeficiente de respuesta de la superficie del terreno a la señal, conocido como dispersión (Fig. 3). La fase ( $\phi$ ) contiene información sobre la distancia recorrida por la señal desde el sensor a la superficie del terreno (R en Fig.2). La fase de una imagen SAR viene dada por la expresión:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot R \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda electromagnética, R es la distancia desde el satélite a la superficie del terreno.

## MÉTODOS DE ANÁLISIS DE IMÁGENES RADAR

### Interferometría diferencial clásica

Los métodos de interferometría radar diferencial (DInSAR) comparan la fase de dos imágenes

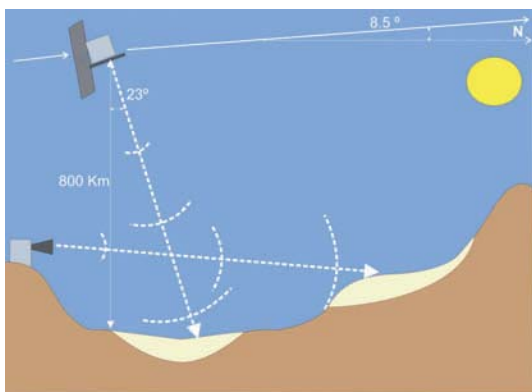


Fig. 2. Geometría de adquisición sistemas radar satélite y terrestre.



Fig. 3. Imagen de amplitud de una imagen SAR satélite.

SAR adquiridas sobre la misma escena en fechas distintas. Si durante dicho intervalo temporal se producen deformaciones de la superficie del terreno (Fig. 4), la diferencia de fase ( $\Delta\Psi_{\text{int}}$ ) de dos imágenes SAR (eq. 2) puede utilizarse para estimar la magnitud de esas deformaciones.

$$\Delta\Psi_{\text{int}} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) \quad (2)$$

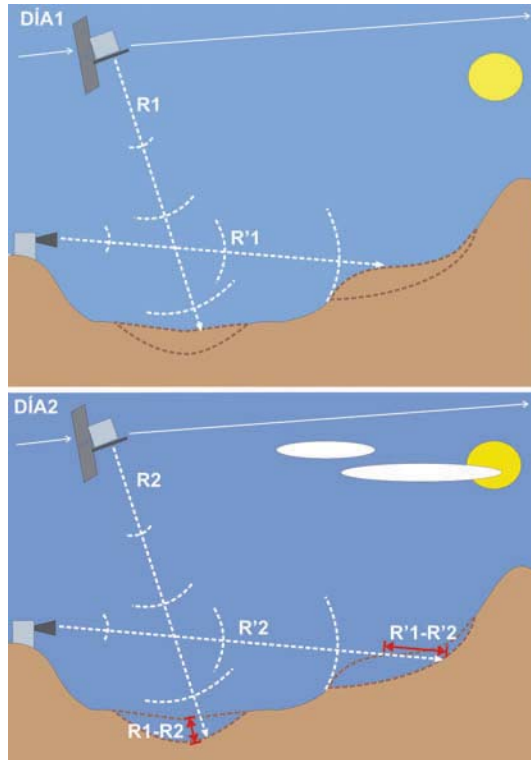


Fig. 4. Geometría de un sistema interferométrico diferencial

En la Figura 5 se muestra el interferograma diferencial generado a partir de dos radar adquiridas por el satélite ENVISAT de la Agencia Espacial Europea el 01-02-2009 y el 12-04-2009 en la zona de L'Aquila (Italia). Las elaboraciones de los datos se han basado en el software DIAPASON y herramientas de análisis desarrolladas por el Instituto de Geomática. Como consecuencia de la crisis sísmica de Abril 2009 se puede apreciar una deformación co-sísmica del terreno de hasta 18 cm. Cada franja de color, del azul al rojo, corresponde a un desplazamiento de 2.8 cm. Partiendo de una zona no afectada por la deformación (A en la Fig.5) se puede contabilizar aproximadamente unas 6-7 franjas, que corresponden a unos 18 cm, hasta llegar a la zona de máxima deformación, ubicada entre L'Aquila y Fossa.

A la diferencia de fase ( $\Delta\Psi_{\text{int}}$ ) se le llama fase interferométrica o interferograma diferencial, y se descompone en una parte relativa a las deformaciones del terreno ( $\Delta\Psi_{\text{deformación}}$ ) y otra parte asociada a distintos errores ( $\Delta\Psi_{\text{errores}}$ ). Estos errores están

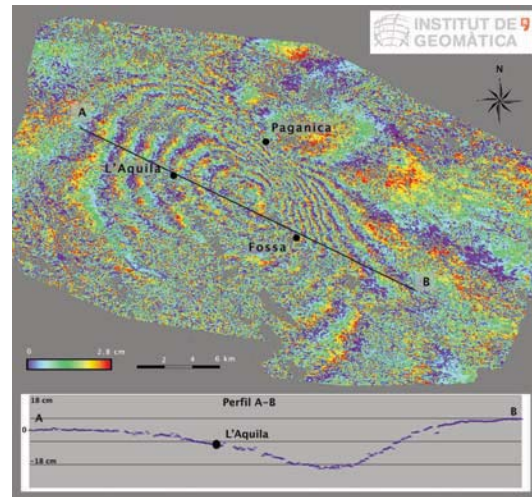


Fig. 5. Interferograma Diferencial de L'Aquila de las imágenes radar adquiridas mediante ENVISAT el 01-02-2009 y el 12-04-2009.

relacionados con la órbita de los satélites, la topografía del terreno, o la variabilidad atmosférica existente entre los dos momentos de adquisición de las imágenes SAR (Mora, 2004).

$$\Delta\Psi_{\text{int}} = \Delta\Psi_{\text{deformación}} + \Delta\Psi_{\text{errores}} \quad (3)$$

Los métodos DInSAR no pueden ser aplicados a cualquier caso debido a que existen ciertas limitaciones que degradan sustancialmente los resultados. El conocimiento de estos factores resulta de gran relevancia en el cálculo de los movimientos del terreno, ya que influyen en la precisión final. La coherencia ( $\gamma$ ), es un parámetro cuya magnitud está relacionada con la calidad conseguida en la estimación de la fase interferométrica, varía entre 0 (baja calidad) y 1 (alta calidad). Una de las fuentes que más incide en la reducción del valor de coherencia son los cambios que se producen en la superficie del terreno en el intervalo de tiempo existente entre la adquisición de las dos imágenes radar. En este sentido, en aquellos terrenos en los que la vegetación es abundante la coherencia es baja, ya que por un lado la penetración de la señal radar es parcial (Fig. 1) y por otro el rebote de la señal radar cambia según la estación del año (Fig.6). Por el contrario en zonas urbanas o con una abundante presencia de rocas la coherencia es alta, ya que como la geometría de un edificio o una roca permanece constante a lo largo del tiempo la señal radar rebota de forma similar (Fig.6). Otra de las fuentes que alteran la calidad de la fase interferométrica son los errores atmosféricos. Estos se deben a que la situación atmosférica en la zona de estudio puede ser diferente durante la adquisición de las dos imágenes SAR. Estos cambios atmosféricos enmascaran u ocultan la parte de la fase interferométrica debida a los movimientos del terreno y, por lo tanto es fundamental eliminar la componente atmosférica, aunque esta tarea no es nada sencilla.



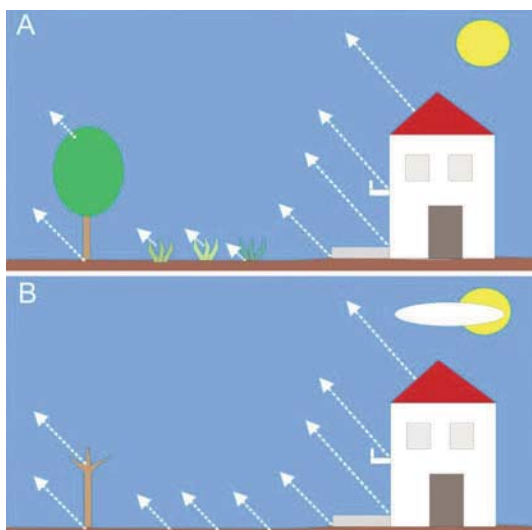


Fig. 6. Esquema sobre la variabilidad del rebote de la señal radar en función de la época del año.

### Interferometría diferencial avanzada

Los métodos de interferometría diferencial avanzada (A-DInSAR) se comenzaron a desarrollar a principios de este milenio (Ferreti et al., 2000). Estas técnicas se fundamentan en la utilización de un gran número de imágenes SAR (al menos 20 o 25 imágenes), lo que permite mejorar la estimación de la deformación y minimizar la parte de error asociada a la variabilidad atmosférica.

Para aplicar estos métodos son necesarios los siguientes datos de partida: una colección de imágenes SAR adquiridas durante el periodo de interés, las órbitas precisas del satélite en el momento exacto de la adquisición de cada imagen, y un modelo numérico del terreno (MNT) del área de estudio. En la Figura 7 se muestra un esquema de los métodos

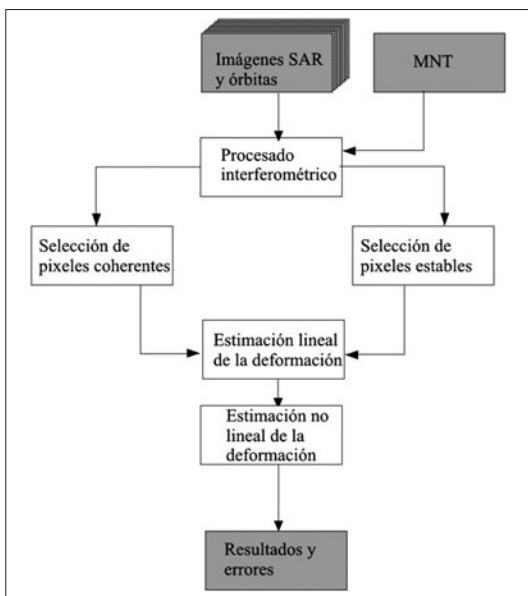


Fig. 7. Esquema de los métodos de interferometría diferencial avanzada.

de interferometría diferencial avanzada. En este caso, el procesado interferométrico se aplica a un conjunto de imágenes SAR en vez de a un par de imágenes, tal y como se ha explicado anteriormente.

El paso fundamental de estos métodos es la selección de aquellos píxeles en los que se va a estimar la deformación. Esta selección puede realizarse mediante análisis de la coherencia o análisis de la amplitud. En el primer caso se calcula la coherencia de cada píxel de cada uno de los interferogramas, y se establece un valor umbral de coherencia por encima del cual se seleccionarán los píxeles en los que se va a estimar la deformación. Este método de selección de píxeles da nombre a la técnica de los píxeles coherentes (CPT) que ha sido utilizada para estudiar distintos procesos activos superficiales tal y como se presenta posteriormente (Mora et al., 2003). El método de selección de píxeles por amplitud selecciona los píxeles del conjunto de imágenes SAR en los que la señal radar rebota de una forma estable a lo largo del periodo de observación. Este método de selección de píxeles lo incorpora el método de la red de puntos estables (SPN) desarrollado por (Arnaud et al., 2003; Duro et al., 2004). Algunos resultados obtenidos con este método se muestran en secciones sucesivas. Una vez que se han seleccionado los píxeles por cualquiera de estos dos métodos comienza la estimación de la deformación en dos etapas sucesivas. En primer lugar se estima un término de deformación lineal, que es la velocidad. Posteriormente se estima un término no lineal, que, sumado al primero, permite estimar la evolución de la deformación en el tiempo para cada píxel. Al mismo tiempo se reducen la parte de la fase interferométrica debida a las variaciones atmosféricas y a las demás fuentes de error asociadas. Al final de este proceso se obtienen como principales resultados de esta metodología: la velocidad media y la evolución temporal de la deformación para cada píxel seleccionado a lo largo de todo el periodo analizado, así como una serie de parámetros que permiten evaluar la calidad de los resultados obtenidos para cada píxel.

### Radar terrestre

Los sistemas de radar terrestre son similares a los sistemas radar satélite, están formados por un sensor radar que se desplaza a lo largo de un rail de 2.8 m fijado al terreno, en vez de a lo largo de la órbita del satélite (Fig. 8). Este sistema de radar terrestre permite monitorizar un área de la superficie del terreno concreta a una distancia de hasta 4 km, con una resolución espacial de hasta 4 m x 4 m. La resolución varía en función de la distancia a la que está ubicada el equipo respecto a la zona de estudio, cuanto más cerca esté el equipo del objetivo mejor será la resolución, y viceversa.

Una ventaja adicional del sistema terrestre sobre el satélite es que puede adquirir una imagen cada poco tiempo, permitiendo establecer la frecuencia de adquisición de imágenes radar por debajo inclu-

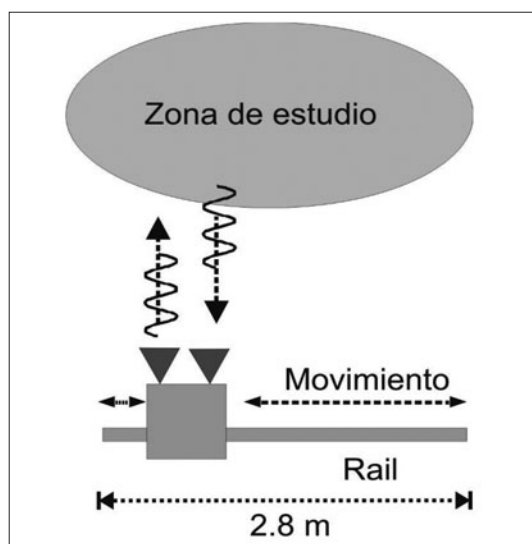


Fig. 8. Esquema del funcionamiento de un equipo radar.

so de 1 imagen radar por cada 20 minutos. Sin embargo, en el caso de los sistemas radar satélite la frecuencia de adquisición de una imagen radar sobre la misma zona varía entre 35 y 11 días en función del satélite utilizado. El satélite ENVISAT de la agencia espacial europea (ESA) tarda 35 días en pasar por el mismo punto mientras que el satélite TERRASAR-X de la agencia espacial alemana (DLR) tarda 11 días. La frecuencia de adquisición de imágenes radar es un aspecto fundamental ya que condiciona la velocidad de la deformación máxima observable. Esto quiere decir que con los sistemas radar satélite solo se pueden monitorizar movimientos del terreno muy lentos, mientras que con los sistemas radar terrestre se pueden monitorizar movimientos moderados (Tabla 1).

Clase	Descripción	[m/s]	Radar satélite	Radar terrestre
1	Extremadamente lento	$5 \times 10^{-10}$	Sí	Sí
2	Muy lento	$5 \times 10^{-8}$	Parcialmente	Sí
3	Lento	$5 \times 10^{-6}$		Sí
4	Moderado	$5 \times 10^{-4}$	Parcialmente	Parcialmente
5	Rápido	$5 \times 10^{-2}$		
6	Muy rápido	5		
7	Extremadamente rápido	$> 5$ m/s		

Tabla 1. Escala de velocidad propuesta por IGUS/WGL, 1995 respecto a los límites de monitorización de los sistemas radar.

Una vez que se han adquirido un conjunto de imágenes radar durante un periodo deseado, las imágenes se calibran y se focalizan utilizando un modelo numérico externo (MNT) de la ladera monitorizada. El análisis de las imágenes radar terrestre es muy similar al de las imágenes radar satélite y puede ser consultado en Noferini et al. (2007). En primer lugar se generan los interferogramas. Posteriormente se calcula la coherencia de cada píxel de cada interferograma para poder seleccionar aquellos píxeles de calidad, en los cuales se estimará la velo-

cidad de la deformación. Finalmente se calcula la deformación experimentada entre cada par de imágenes que conforma un interferograma, eliminando la componente del incremento de fase interferométrica relativa a los errores atmosféricos. Al igual que en el caso de los métodos de interferometría diferencial avanzada, se pueden seleccionar los píxeles estables mediante el análisis de la amplitud en vez de la coherencia.

## CASOS PRÁCTICOS

### Subsidencia por descenso del nivel freático de Murcia

Se ha utilizado el método de interferometría diferencial avanzada SPN (Arnaud et al., 2003; Duro et al., 2004) para estudiar la subsidencia por extracción de agua subterránea del área metropolitana de Murcia. La ciudad de Murcia, con una población que sobrepasa los 400.000 habitantes, ocupa la Vega Media de la cuenca del río Segura, la cual está formada por un sistema acuífero detrítico multicapa que llega a los 250 m y que está constituido por los aportes sedimentarios fluviales del río Segura acumulados desde el Plioceno. Los primeros 30 m bajo la superficie están ocupados por sedimentos recientes no consolidados (arcillas, limos y arenas), y constituyen la capa de material compresible responsable de la subsidencia (Mulas, 2000; Martínez et al., 2004).

En este caso de estudio se han analizado dos grupos de imágenes SAR obtenidas por los satélites ERS-1/2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea, cubriendo dos periodos temporales desde Julio de 1995 a Diciembre de 2005 y desde Enero de 2004 a Diciembre de 2008. Para ello se seleccionó un área de 20 km x 8 km de todas las imágenes SAR que corresponde a la Vega Media del Río Segura. Para procesar las imágenes radar se ha seleccionado el método de selección de píxeles de amplitud, lo que ha permitido detectar más de 60.000,00 píxeles estables a máxima resolución (4 m x 20 m) en toda la zona de estudio.

La Figura 9 muestra la deformación total estimada al final de ambos periodos proyectada a lo largo de la línea de vista del satélite (LOS), para cada uno de los píxeles seleccionados. De esta manera en el primer periodo se han estimado velocidades de subsidencia que oscilan entre +5.3 y -10.3 mm/año, y entre +4.3 y -25.6 mm/año en el segundo periodo. Comparando ambos periodos se puede apreciar que la velocidad de la deformación se ha duplicado en el periodo 2004 - 2008 respecto periodo 1995 - 2005. La causa de esta aceleración de la subsidencia se debe al descenso piezométrico de entre 6 y 13 m que ha experimentado el área metropolitana coincidiendo con el último periodo de sequía iniciado en 2005. Un estudio en detalle de este fenómeno aplicando distintos métodos de interferometría diferencial avanzada, así como para mejorar modelos numéricos de predicción de la subsidencia puede encontrarse en Tomás et al. (2005), Herrera (2008a), Herrera et al. (2008b), Herrera et al. (2009a) y Tomás (2009).

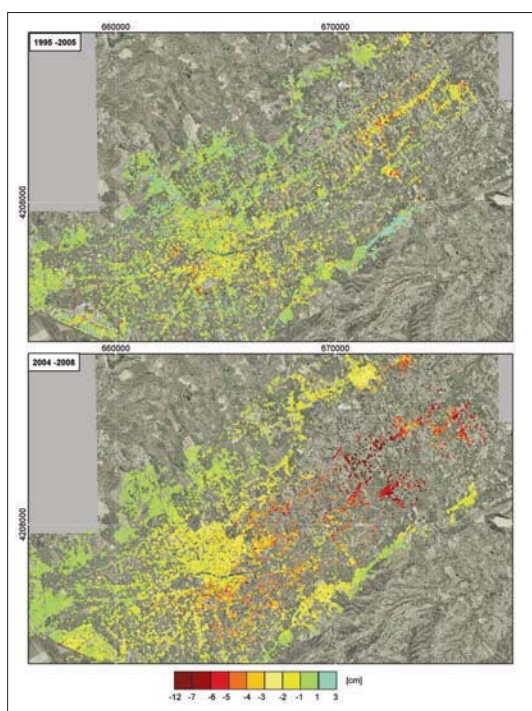


Fig. 9. Deformación total acumulada en el periodo 1995 - 2005 y en el periodo 2004 - 2008 estimada mediante el método SPN en el área metropolitana de Murcia.

### Subsidencia y movimientos de ladera en la Sierra de Cartagena

En la Sierra de Cartagena, ubicada en el dominio interno de las cordilleras Béticas, se ha utilizado el método de interferometría diferencial avanzada CPT (Mora et al., 2003) para estudiar los movimientos del terreno entre 1998 y 2004. Esta zona de estudio ha sido explotada por la minería de Pb-Zn en distintos periodos intermitentes desde la época de los romanos, dejando como legado histórico una gran concentración de minados en la zona que generan distintos tipos de inestabilidades del terreno. En Mayo de 1998 comenzaron a observarse importantes asentamientos del terreno, de hasta 50 cm/año, motivados por el colapso de galerías mineras abandonadas, que afectaron a las edificaciones del polígono industrial de Lo Tacón, ubicado en el término municipal de La Unión (Rodríguez-Estrella, 2000).

En este caso de estudio se han analizado dos grupos de imágenes SAR obtenidas por los satélites ERS-1/2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea, cubriendo dos periodos temporales desde Enero de 1998 a Diciembre de 2000 y desde Marzo de 2003 a Diciembre de 2004. Para ello se seleccionó un área de 10 km x 5 km de todas las imágenes SAR que corresponde a la Sierra de Cartagena. Para procesar las imágenes radar se ha seleccionado el método de selección de píxeles de coherencia, lo que ha permitido detectar más de 7.000 píxeles coherentes con una resolución de 80 m x 80 m en toda la zona de estudio. Las deformaciones totales estimadas mediante la técnica CPT han permitido de-

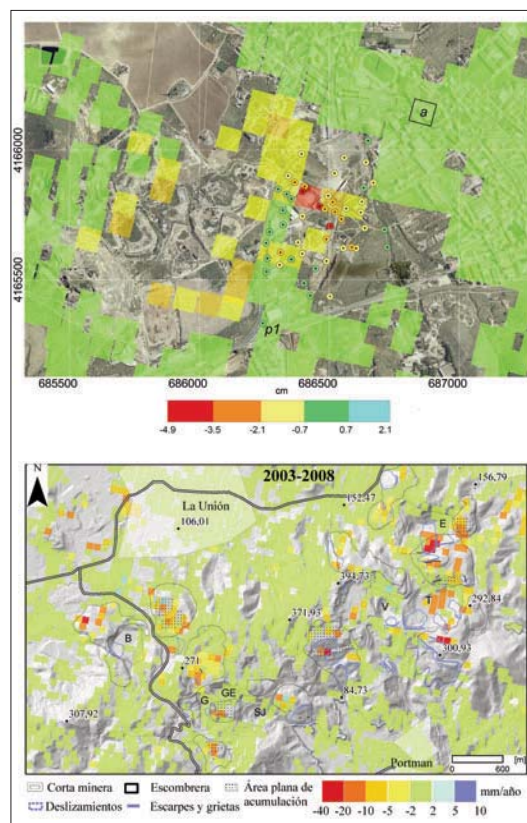


Fig. 10. a. Deformación total estimada para el periodo 2003 - 2004 mediante el método CPT en el polígono industrial de Lo Tacón. Los círculos corresponden a los puntos nivelados topográficamente. b. Movimientos de ladera detectados en las cortas mineras de la Sierra de Cartagena a partir del mapa de deformaciones totales estimado mediante la técnica CPT para el periodo 1998 - 2004.

tectar y monitorizar diferentes procesos de deformación activos en el área de estudio. De esta manera se ha podido comprobar que en el periodo 2003-2004 la velocidad de la subsidencia minera se había reducido hasta los 5 cm/año (a en Fig. 10a) (Herrera et al., 2007). Por otro lado se han detectado deformaciones asociadas a movimientos de ladera no estudiados anteriormente, en las cortas mineras abandonadas de la Sierra de Cartagena. Los más frecuentes son los movimientos compuestos del tipo deslizamientos roto-traslacionales con flujo de derrubios y deslizamientos traslacionales con desprendimiento de rocas (Fig. 10b). Un estudio en detalle de estos movimientos aplicando el método CPT puede encontrarse en Herrera (2008a).

### Movimientos de ladera en el Pirineo Central

En la cuenca del río Gállego, ubicada en el Pirineo Central (Huesca, España), se ha utilizado un sistema radar satélite y otro terrestre para estudiar movimientos del terreno asociados a zonas montañosas tanto a escala regional como a escala local. En el primer caso se ha utilizado el método de inter-



ferometría diferencial SPN (Arnaud et al., 2003; Duro et al., 2004) para estudiar los movimientos del terreno entre 1995 y 2007 a nivel regional. Para realizar un estudio local se utilizó un radar terrestre (GB-SAR) para monitorizar de manera continua el deslizamiento del Portalet, ubicado al norte de la cuenca del río Gállego, entre Septiembre y Noviembre de 2006 (Herrera et al., 2009b). El Alto Gállego es una zona que presenta distintas tipologías de movimientos de ladera desarrolladas en los materiales paleozoicos y Flysh del Eoceno (García-Ruiz et al., 2004), que están influenciados por las particulares condiciones climatológicas (Creus y Gil, 2001) de esta zona de estudio.

Con el método SPN se han analizado dos grupos de imágenes SAR obtenidas por los satélites ERS-1/2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea, cubriendo dos periodos temporales desde Enero de 1995 a Diciembre de 2000 y desde Enero de 2001 a Agosto de 2007. Para ello se seleccionó un área de 30 km x 20 km de todas las imágenes SAR que corresponde a la cuenca del río Gállego. Para procesar las imágenes radar se ha seleccionado el método de selección de píxeles de coherencia lo que ha permitido detectar más de 48.000 píxeles coherentes con una resolución de 20 m x 20 m en toda la zona de estudio (Fig.11). Estos resultados han permitido identificar deformaciones en 145 movimientos de ladera, detectando una media de 20 píxeles por depósito.

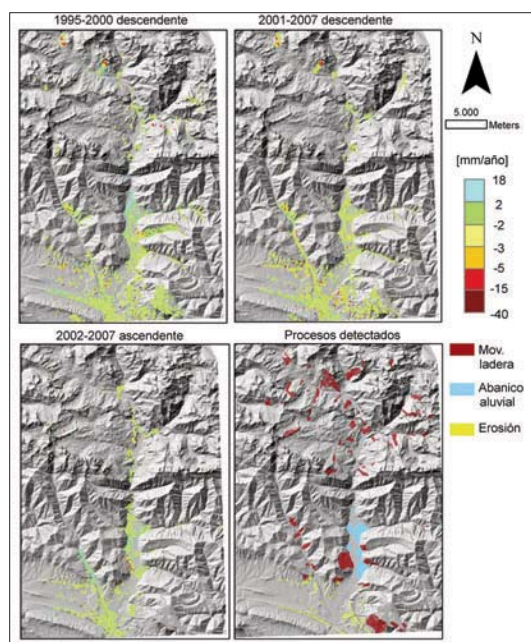


Fig. 11. Deformaciones medidas mediante la técnica SPN en la cuenca del río Gállego.

En el Portalet dos deslizamientos formados por pizarras y areniscas muy alteradas y plastificadas del Carbonífero y Devónico, fueron reactivados en el verano de 2004 por la excavación de un área de parking en el pie de ambos depósitos (Fig.12). En esta zona de estudio los desplazamientos estimados mediante

el análisis de imágenes radar satélite oscilan entre + 1.2 y -15 mm/año (escala de color que oscila entre el verde y el rojo en Fig.12), y solo se han podido estimar en aquellas zonas donde abundan las rocas. Esto se debe a que la señal radar rebota de una manera intensa y estable a lo largo del tiempo en las rocas, lo que ha permitido identificar píxeles coherentes en los que estimar la deformación en dichas superficies.

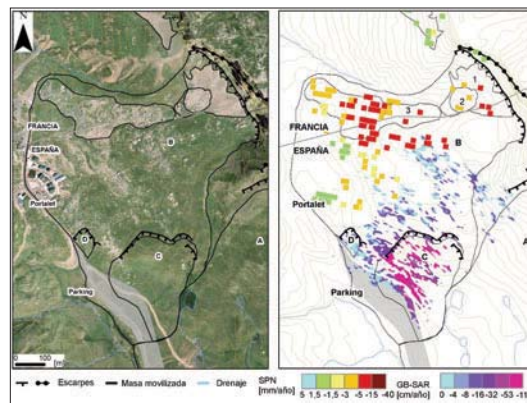


Fig. 12. SPN y GB-SAR deslizamiento del Portalet.

El sistema de radar terrestre empleado entre Septiembre y Noviembre de 2006, permitió adquirir una imagen SAR cada hora durante 47 días. El procesado interferométrico de estas imágenes permitió estimar deformaciones de 15 cm en 47 días (110 cm/año) en la parte más activa del deslizamiento (escala de color del azul al rosa en la Fig.11). En esta zona, donde tan solo se observan algunas rocas aisladas, no se detectaron píxeles coherentes en el análisis de imágenes satélite radar. Esto se debe a que la frecuencia de adquisición de las imágenes radar del GB-SAR es de 1 imagen SAR a la hora, por 1 imagen SAR cada 35 días, en el caso del radar satélite. La elevada frecuencia de adquisición de imágenes SAR del radar terrestre ha permitido en el Portalet detectar píxeles coherentes en zonas donde no hay rocas en las que la altura de la vegetación es baja. Un estudio de detalle de los resultados del radar terrestre en el Portalet se presentan en Herrera et al. (2008c) donde se calibra un modelo numérico de predicción del deslizamiento basado en los datos del radar terrestre.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los sistemas de radar satélite y terrestre para la adquisición de imágenes SAR, así como los métodos de interferometría diferencial mediante los cuales se pueden analizar las imágenes SAR para detectar y monitorizar en el espacio y en el tiempo las deformaciones de la superficie del terreno. Posteriormente se han introducido algunos casos de estudio ilustrativos en los que se han investigado la dinámica espacial y temporal de distintos procesos activos superficiales de tipo subsidencia y movimientos de ladera.

Los sensores radar emiten ondas microondas de distinta longitud de onda que rebotan en la superficie del terreno para ser recogidas de nuevo por el sensor radar. Una ventaja fundamental de estas ondas es que son independientes de la luz solar, y que pueden penetrar parcialmente nubes, nieve y vegetación. La capacidad de penetración depende del medio atravesado y de la longitud de onda a la que trabaja cada sensor, a mayor longitud de onda mayor capacidad de penetración en zonas vegetadas pero peor resolución espacial. La ventaja de la interferometría radar respecto a otros métodos de teledetección, es que permite medir la distancia existente entre el sensor radar y la superficie del terreno radiada. Esta característica permite comparar distancias "radar" adquiridas en momentos temporales distintos de un mismo punto del terreno. De esta manera los distintos métodos avanzados de análisis de imágenes radar estiman la evolución temporal de la deformación de cada píxel con una precisión milimétrica. La selección de los píxeles en los que se va a estimar la deformación se realiza mediante el análisis de la coherencia o de la amplitud.

La coherencia es el parámetro que determina la calidad de los píxeles de cada interferograma, es decir, cuan estable es la señal radar que rebota en un mismo punto del terreno en las fechas en las que se adquieren las imágenes SAR. Si un mismo punto del terreno tiene valores de coherencia altos para todos los pares de imágenes SAR que componen los interferogramas, ese píxel es seleccionado para estimar la deformación, ya que el rebote de la señal radar se mantiene estable a lo largo del tiempo. En este caso la resolución de los píxeles en los que se estima la deformación se reduce hasta 80 m x 80 m, en el caso de que se analicen imágenes radar en banda C. El otro método selecciona píxeles de las imágenes SAR en función del análisis de la amplitud de cada píxel. La amplitud es el parámetro que determina la intensidad del rebote de la señal radar en cada píxel de la imagen SAR. Si un mismo punto del terreno tiene valores de intensidad altos para todas las imágenes radar analizadas, ese píxel es seleccionado para estimar la deformación ya que el rebote de la señal radar se mantiene estable a lo largo del tiempo. En este caso el píxel mantiene la resolución original de la imagen de 4 m x 20 m, en el caso de que se analicen imágenes radar en banda C. Utilizando el método de selección de coherencia, la densidad de píxeles detectados en el casco urbano de La Unión ha sido de 150 píxeles/km<sup>2</sup>, respecto a más de 600 píxeles/km<sup>2</sup> en el casco urbano de Murcia, en el que se ha utilizado el método de selección por amplitud. Esto demuestra que en zonas urbanas el método de selección por amplitud proporciona más puntos de observación y con mayor resolución. No obstante en zonas rurales poco o nada urbanizadas, es mejor utilizar el método de selección de coherencia ya que el rebote de la señal radar suele ser poco intenso e inestable a lo largo del tiempo. De esta manera en la Sierra de Cartagena se han detectado 50 píxeles/km<sup>2</sup> y 20 píxeles/km<sup>2</sup> en la cuenca del Gállego.

Otro aspecto fundamental que incide en la densidad de píxeles detectados en la superficie del terreno estudiada es la frecuencia de adquisición de imágenes radar. Cuanto mayor sea el número de imágenes adquiridas para un mismo intervalo temporal, más estable a lo largo del tiempo será la señal radar que rebota en la superficie del terreno. De esta forma se ha podido comprobar en el Portalet que la frecuencia de adquisición de imágenes SAR del radar terrestre de una imagen/hora, ha permitido detectar píxeles coherentes en una zona vegetada donde apenas se encuentran rocas, mientras que en esta misma zona no se ha detectado ningún píxel coherente en el análisis de las imágenes radar obtenidas por el satélite ENVISAT (una imagen/35 días). La frecuencia de adquisición de las imágenes SAR incide directamente en la magnitud de la deformación máxima que se puede detectar mediante el análisis de los datos radar. Al combinar dos imágenes radar para generar un interferograma se pueden detectar deformaciones máximas para cada píxel equivalentes a la mitad de la longitud de onda de la señal radar emitida. En el caso de las señales radar emitidas en banda C, que tienen una longitud de onda de 6 cm, la deformación máxima detectable para cada píxel del interferograma es de 3 cm. De esta manera si la frecuencia de adquisición de las imágenes es de 35 días, la deformación máxima detectable será de 3 cm/35 días para cada píxel del interferograma. Por el contrario si la frecuencia se reduce a 1 hora, la deformación máxima detectable será de 3 cm/hora para cada píxel del interferograma. Por este motivo el radar terrestre tiene mayor capacidad para detectar movimientos más rápidos que el satélite, ya que este está condicionado por la frecuencia de revisitado de un mismo punto del terreno que suele ser de 35 días. En el deslizamiento del Portalet se han estimado deformaciones máximas de 4 cm/año mediante análisis de imágenes radar satélite, mientras que el radar terrestre ha detectado deformaciones de hasta 110 cm/año.

Las diferencias más evidentes entre los sistemas terrestre y satélite son la cobertura espacial y temporal. En el caso del radar satélite una imagen SAR tiene una dimensión de 100 km x 100 km para los sensores que emiten en banda C, mientras que en el caso del radar terrestre el área monitorizada se limita a un par de kilómetros cuadrados. En el caso del radar satélite la resolución máxima puede ser de 4 m x 20 m en banda C, mientras que el radar terrestre puede llegar a 1 m x 1 m, dependiendo de la distancia a la que se coloca el sensor. En cuanto a la visibilidad de la zona de estudio respecto a ambos sistemas, las laderas orientadas al norte o al sur son difícilmente detectables mediante radar satélite, siendo la orientación este oeste la más adecuada. En el caso del radar terrestre la orientación de la ladera no es significativa, pero sí es necesario que exista un punto de observación a menos de 4 km desde el cual se visualice la zona de interés. En cuanto a la cobertura temporal, los satélites radar ERS-1/2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea han generado un archivo histórico de imágenes radar disponible desde 1991, mientras que el radar terrestre



depende de su instalación en la zona de interés en un periodo temporal futuro posterior a la planificación de la campaña de medición.

En los distintos casos de estudio presentados en este trabajo se han mostrado cuales son los resultados obtenidos al analizar imágenes radar satélite y terrestre mediante distintos métodos de interferometría diferencial avanzada. Del mismo modo también se ha descrito brevemente qué tipo de investigaciones se han llevado a cabo con los desplazamientos estimados para profundizar en el conocimiento de las subsidencias y movimientos de ladera estudiados, indicando referencias de los trabajos que detallan estas investigaciones. Los sistemas radar y los métodos de análisis de imágenes radar se han desarrollado y validado en los últimos años para el estudio de la dinámica de los movimientos del terreno, pero su utilización para la mejora de modelos de predicción a distintas escalas de los mismos es una línea de investigación incipiente.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados que se muestran en este trabajo han sido financiados por el Instituto Geológico y Minero de España, y los proyectos GMES TerraFirma de la Agencia Espacial Europea, el proyecto Galahad del Sexto Programa Marco, así como por los convenios de investigación existentes con la Región de Murcia.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J., Eineder, M. (2003). ASAR ERS interferometric phase continuity. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 21-25 July, Toulouse, France.
- Colwell, R.N. (1997). "History and Place of Photographic Interpretation". In: Philipson, W.R. (ed.), Manual of photographic interpretation (2nd ed.), p. 3-47. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- Creus, J., Gil, M. (2001). *Clima*. In: Ministerio de Ciencia y Tecnología (Ed.), Instituto Geológico y Minero de España. El medio físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo Central, Madrid, pp. 39-41.
- Duro, J., Inglada, J., Closa, N., Adam, A., Arnaud (2004). "High Resolution Differential Interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data" *ENVISAT Symposium*, Salzburg.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 39, 8-20.
- García-Ruiz, J.M., Chueca, J., Julián, A. (2004). *Los movimientos en masa del Alto Gállego. Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*. Universidad de Zaragoza, 142-152.
- Herrera, G., Tomás, R., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J., Mallorquí, J.J., Duque, S., Mulas, J. (2007). Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineering Geology*, 90, 148-159.
- Herrera, G. (2008a). *Aplicación de la Interferometría SAR Diferencial Avanzada CPT al estudio de los Riesgos Geológicos y Mineros*. Universidad Politécnica de Madrid. PhD. 206 pp.
- Herrera, G., Tomás, R., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, Vicente, F., Mulas, J., Cooksley, G., Sanchez, M., Duro, J., Arnaud, A., Blanco, P., Duque, S., Mallorquí, J.J., De la Vega-Panizo, R. (2008b). Comparison of Advanced Differential Interferometry Techniques: Murcia metropolitan area case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. En prensa.
- Herrera, G., J.A. Fernández-Merodo, J. Mulas, M. Pastor, G. Luzi, O. Monserrat, (2008c). Use of ground based sar data in landslide forecasting models: the portalet case study. *Engineering Geology*. En prensa.
- Herrera, G., Fernández-Merodo, J.A., Tomás, R., Mulas, J., (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia using PSI data: validation and modeling. Enviado a *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- IGUS/WGL – International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, (1995). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *IAEG Bulletin*, 75 -78.
- Martínez, M., Mulas, J., Herrera, G., & Aragón, R. (2004). Efectos de una subsidencia moderada por extracción de agua subterránea en Murcia, España. *Proc. XX-XIII Congress of IAH-ALHSUD, Conference on Groundwater Flow Understanding from local to regional scales*, Zacatecas, Mexico, 249-252.
- Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 41, 2243-2253.
- Mora, O. (2004). *Advanced differential SAR techniques for detection of terrain and building displacements*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, 182 pp.
- Mulas, J. (2000). *Estudio Geotécnico del subsuelo del Área Metropolitana de Murcia*. Instituto Geológico y Minero de España, 200 pp.
- Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Macaluso G., Atzeni C., Mantovani M., Marcato G., Pasuto A., Silvano S., Tagliavini F. (2007). Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide, *Engineering Geology*, 95, 88-98.
- Rodríguez Estrella, T., Manteca, J. L., & García, C. (2000). Subsidencia minera, en relación con sismotectónica, en La Unión (Murcia). *Geotemas*, 1, 150-153.
- Tomás, R. (2009). Estudio de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial avanzada. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. 480 pp.
- Tomás, R., Márquez, Y., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorquí, J.J., Martínez, M., Herrera, G., Mulas, J. (2005). Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of the Environment*, 98, 269 - 283. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 3 de febrero de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 21 de mayo de 2009.*